

长距离高落差大流量倒虹吸爆管水锤防护研究

刘有亮, 胡斌超, 蔡永芳, 陶承军, 王龙彪, 尹大壮

(甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:长距离高落差有压自流输水管线工程在西北地区日益增多, 管线多数呈现出高低起伏形状, 整条管线系统在运行调节过程中水力过渡过程也变得十分复杂, 水锤防护设置的不合理严重时将导致爆管, 严重威胁人民生命及财产安全。为了能使整个系统安全运行, 采用特征线法, 使用 HAMMER V8i 水锤分析软件研究分析某输水工程中较长高落差的倒虹吸水力过渡过程, 通过在管线沿线设置隔断检修阀、淹没式消能阀及排气阀和在管线末端设调节阀后, 管线在正常运行及关阀时管线系统的正压得到有效控制。通过模拟分析爆管后不同流量时管线系统水力过渡过程, 设置的水锤防护设备将爆管所造成的危害降至最低, 完全爆管后管线系统的流量并不连续。长距离高落差倒虹吸管线水锤防护设备的动作时间及运行规律在整个系统安全中起到关键作用。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词:倒虹吸; 淹没式消能阀; 水锤; 爆管

中图分类号: TV672⁺.5; TU991.39

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0127-04

1 概况

某大型跨流域调水工程位于甘肃西北地区, 规划水平年调水量 $7.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工程受水区为甘肃省 3 市 20 县区及外省 4 县区供水。主要由水源工程、输水总干线工程、输水干线工程和末端调蓄水库工程四部分组成。其中输水总干线地跨长江、黄河两大流域, 穿越西秦岭、六盘山两大分水屏障, 沿途地形地质条件复杂, 长距离高落差的倒虹吸管线水力过渡过程尤其复杂, 开关阀及调节过程中极有可能导致管线不稳定运行, 严重时可能导致爆管。输水总干线共布置 12 座倒虹吸, 总长 84.710 km。本工程管线走势呈“W”形, 具有两个低谷。管线最长、落差最大的倒虹吸设计输水流量为 $14.76 \text{ m}^3/\text{s}$, 输水线路全长 35.65 km, 管线谷底最大静压 345 m, 管线为双管平行布置。管道工作压力 1.6 MPa 以下采用预应力钢管混凝土管, 管道内径 2 200 mm。管道工作压力 1.6 MPa 以上采用内外涂塑复合钢管, 管道内径 2 400 mm。倒虹吸平面示意图见图 1。为使倒虹吸管线正常稳定运行, 爆管后造成的影响最小, 需认真分析其水力过渡过程。然而, 目前对倒



图 1 倒虹吸平面示意图

Fig. 1 Plan diagram of inverted siphon

虹吸管线爆管的研究分析较少, 爆管后的管线系统的水力过渡过程及防护设置具有一定的研究意义。

2 水锤及方程

当压力管道中的流体因某些原因而产生流速急剧变化时, 由于流体的惯性作用而引起管道内流体压力急剧变化, 这种现象称为水锤现象^[1]。

水锤基本方程由运动方程和连续方程两部分组成, 该方程能反映有压管流在水力过渡过程中水流流速和水头的变化规律。有压管道过渡过程的计算方法有解析法、图解法、电算法和简易计算法等四类。目前水锤计算主要采用特征线法, 该法计算精度高、边界条件容易编程。特征线法主要考虑管道摩阻损失将水锤偏微分方程沿其特征

收稿日期: 2023-08-19, 修回日期: 2023-09-26

作者简介: 刘有亮(1985-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利水电工程水力过渡过程以及抽水蓄能电站水力机械设计, E-mail: 94536900@qq.com

线变换为常微分方程,然后近似变成差分方程,再进行数值计算。水锤计算的边界条件有上、下游端水池、管道下游阀门。水锤基本方程、特征线法方程及边界条件的相关方程见文献[1]。

3 水锤分析及防护措施

首先分析正常开关阀的动作规律,其次重点研究分析爆管后管道系统压力波动情况及水锤防护设备的动作规律[2]。水锤分析计算后的正压需满足《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》[3]中 6.1.4 条要求(水锤防护措施设计应保证输水管道最大水锤压力不超过 1.3~1.5 倍最大工作压力)。负压值参考《泵站设计标准 GB50265-2022》[4]中 10.4.2 第 4 条,管线最低负压值控制在-4 m 内。

3.1 倒虹吸管线设备选型及布置

为保证工程输水管道系统的安全稳定运行,需设置必要的水机设备及水锤防护设备,满足管道系统的输水控制、安全监测、运行检修、管道进排气和放空等,并且满足过渡过程压力控制要求。倒虹吸管线设置的水锤防护设备主要有调流调压阀、液控蝶阀、隔断检修阀、空气阀[5]、淹没式消能阀等。倒虹吸示意简图见图 2。

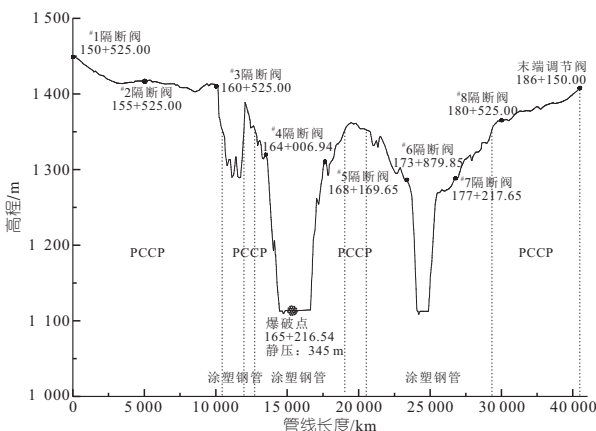


图 2 倒虹吸示意简图

Fig. 2 Schematic diagram of inverted siphon

3.2 正常运行过渡过程分析计算

单管设计流量 7.38 m³/s 运行时末端调节阀动水压力为 5 m,调节阀为液控蝶阀;低于设计流量时末端动水压力增大,由于液控蝶阀不能在较大压差下工作,末端调节阀为调流调压阀。通过不同关闭时间的对比计算,末端液控蝶阀和调流调压阀的关闭时间[6]均选取 1 020 s(从全开到全关),整条管线系统在开阀、关阀及流量调节过程正压满足规范要求,管线无负压。稳态运行及关阀计算结果见图 3。末端调节阀的关闭时间为爆管模拟分析研究提供计算依据。

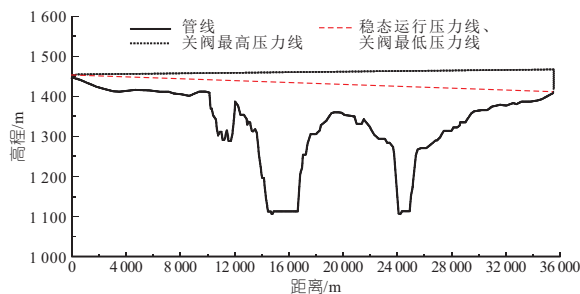


图 3 正常运行时关阀沿线压力包络线图

Fig. 3 Pressure envelope diagram along the closed valve during normal operation

3.3 爆管后最大流量的确定

假设谷底管道完全爆开,与下游管路完全脱节,此时管道内流量最大。在 HAMMER 软件中,模型的处理方法是假设谷底 165+216.54 位置管道出口为大气压。计算结果见图 4,由图 4 可知,当管线谷底完全爆开后,管线完全被拉断,经恒定流计算得出管道的最大瞬时流量为 38.4 m³/s,但管线流量并不是连续状态,出现这种现象是因为管线前 13 km 落差较小,13 km 之后管线落差大幅增加,爆管一瞬间管道内流速急剧上升,从而使水柱拉断。因此倒虹吸爆管后流量并非连续,还取决于管线地形(谷底前段管线呈现为凸曲线)。本工程管线当谷底完全爆管后由于水柱拉断水流不连续从而不会出现大量弃水。如果谷底前段管线呈现为凹曲线,管道内水流不会被拉断,爆管点位置流量为连续流出。

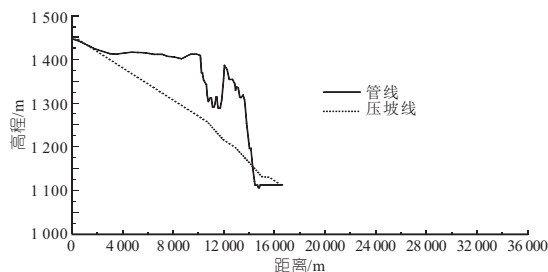


图 4 完全爆管后沿线压力包络线图

Fig. 4 Pressure envelope diagram along the line after complete pipe burst

3.4 最危险爆管点过渡过程分析计算

由图 2 可知,管道高程最低点位于桩号 165+216.54、174+711.85 处,以上两点均位于下坡段和上坡段交汇处,若发生爆管,该点的水流来自管道两侧,为最危险爆管点。以 165+216.54 点爆管作为管道爆管控制工况,复核设置的水锤防护设备动作规律是否满足安全运行要求。

最危险爆管点发生爆管时,需立即关闭#4、#5 隔断阀来切断水源。#4、#5 隔断阀按 600 s 一段线性关闭规律开始关阀,同时#4、#5 隔断阀前后的淹没式调节阀按 120 s 一段线性开阀,然后保持 600 s 全开,再以 120 s 一段线性关阀规律动

作用来泄放关闭时带来的水锤升压。

根据分析计算的最大瞬时爆管流量,本次分析计算爆管流量不应大于最大瞬时爆管流量。因此,爆管模拟分析按爆管后爆破点流量 1 倍单管设计流量 7.38 m³/s、2 倍单管设计流量 14.76 m³/s 和 5 倍单管设计流量 36.9 m³/s 分别分析计算。

1~# 8 隔断阀及末端阀门位置节点的静压、动压及最大允许水锤升压值见表 1。

表 1 节点压力
Tab. 1 Node pressure chart

节点名称	静压/m	动压/m	最大允许水锤升压值/m
# 1 隔断检修阀	5.4	5.3	8.1
# 2 隔断检修阀	36.4	32.0	54.6
# 3 隔断检修阀	42.1	33.1	63.2
# 4 隔断检修阀	134.6	121.6	201.9
# 5 隔断检修阀	146.6	127.9	219.9
# 6 隔断检修阀	168.5	144.0	252.8
# 7 隔断检修阀	165.2	136.3	247.8
# 8 隔断检修阀	86.9	54.7	130.4
末端阀	42.7	5.7	64.1

3.4.1 爆破点流量 7.38 m³/s

爆管时所有阀门不动作(未设空气阀)。谷底最危险爆破点爆管,爆破点压力和流量随时间变化见图 5。由图 5 看出,爆破点瞬态最大压力达 400 多米,在 200 s 后瞬态压力基本稳定,爆管泄漏流量也基本稳定在 7.38 m³/s。由此可分析出爆管发生后,初始时压力和流量波动十分明显,经过一定时间后压力和流量基本稳定下来。全线最高最低压力包络线见图 6,由图 6 看出管线前 10

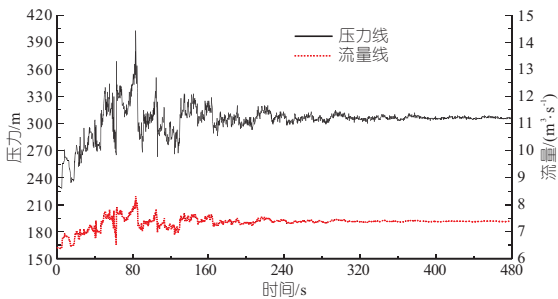


图 5 爆破点流量与压力变化曲线

Fig. 5 Flow and pressure change curve of blasting point

km 呈现负压,管线中间、管线后段约 6 km 管线呈负压,呈现负压段的管线是管线局部高点上游或下游管线。呈现负压管段的最大水锤压力均超过最大允许水锤升压(# 1、# 2、# 3 检修阀最大水锤压力分别为 76、140、96 m),引起压力升高主要原因为水柱拉断引起的弥合水锤。

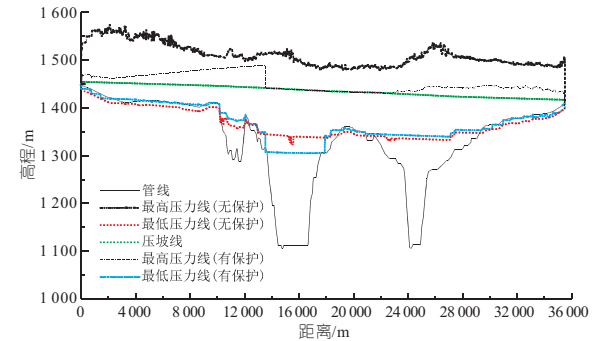


图 6 爆破点流量 7.38 m³/s 时关阀沿线压力包络线图

Fig. 6 Pressure envelope diagram along the valve when the flow rate at the blasting point is 7.38 m³/s

爆管时阀门都动作(设有空气阀^[2])。谷底最危险爆破点爆管,末端调节阀按 1 020 s 一段线性关阀。以下阀门的动作规律均经过多种组合计算后取得最佳动作时间:# 4、# 5 隔断检修阀按 600 s 一段线性关阀,同时 # 4、# 5 隔断检修阀前后的淹没式调节阀按 120 s 一段线性开阀,然后保持 600 s 全开,然后再以 120 s 一段线性关阀。计算结果见图 6、7(a),由图 6 可知,整个管线的压力升高相比无防护时明显降低。需注意 # 4 隔断检修阀位于下坡段,# 5 隔断检修阀位于上坡段,隔断检修阀关闭时,隔断检修阀位置可能出现正压升高过快、过高。由图 7 可知,压力升高主要出现在 # 4 隔断检修阀前,阀前最大瞬态压力为 171 m, # 5 隔断检修阀后最大瞬态压力为 129 m,压力升高在防护设备作用下并不是很高,淹没式消能阀在隔断检修阀关闭时发挥重要作用, # 4 隔断检修阀前淹没式消能阀最大泄放流量约 6.36 m³/s, # 5 隔断检修阀后淹没式消能阀最大泄放流量约 4.98 m³/s。

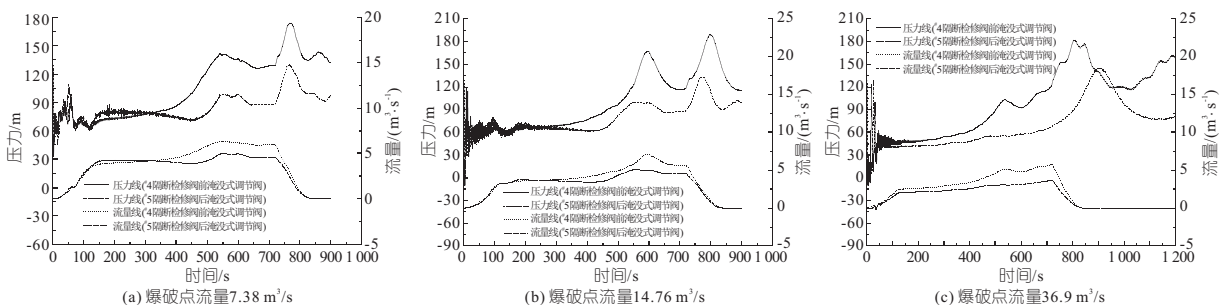


图 7 # 4、# 5 隔断检修阀旁淹没式调节阀压力、流量变化曲线

Fig. 7 Pressure and flow variation curve of submerged energy dissipation valve near # 4, # 5 partition service valve

谷底最危险爆破点流量按 $7.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 模拟分析,由图 6 可知,谷底最危险爆管点一旦爆管,管线无防护时大部分管线出现严重负压,进而出现断流弥合水锤,负压管段压力升高远远超过规范允许压力升高范围。当防护阀门均动作时,大部分管线最大压力升高在合理范围内,最低压力也基本在允许范围内。分析计算时尤其要注意爆管后隔断检修阀关闭造成整个管线系统的压力波动,本工程设置的防护设备将关闭引起系统压力波动降至合理范围,淹没式消能阀在其中起到关键作用。

3.4.2 爆破点流量 $14.76 \text{ m}^3/\text{s}$

谷底最危险爆破点爆管,末端调节阀, #4、#5 隔断阀及前后的淹没式调节阀关闭。计算结果见图 7(b)、8。由图 7(b)可知, #4 隔断检修阀最大瞬态压力为 189 m , #5 隔断检修阀最大瞬态压力为 133 m 。

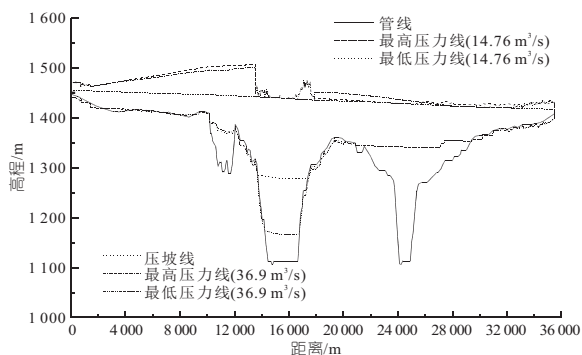


图 8 爆破点流量 $14.76、36.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 时关阀沿线压力包络线图
Fig.8 Pressure envelope diagram along the valve closure line at blasting point flow rate of $14.76 \text{ m}^3/\text{s}$ and $36.9 \text{ m}^3/\text{s}$

谷底最危险爆破点按 $14.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量模拟分析,可以看出大部分管线最大压力升高在合理范围内,最低压力也基本在允许范围内。对比图 6、8 可看出,爆破流量增大后,在水锤防护设备均动作后整个管线系统正压升高并不明显。由图 7(b)可看出, #4 隔断检修阀前淹没式消能阀最大泄放流量约 $7.07 \text{ m}^3/\text{s}$, #5 隔断检修阀后淹没式消能阀最大泄放流量约 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,通过与爆管流量 $7.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 计算结果对比发现,爆管流量增大后 #4 隔断检修阀前淹没式消能阀泄放流量略微升高, #5 隔断检修阀后淹没式消能阀泄放流量基本不变。

3.4.3 爆破点流量 $36.9 \text{ m}^3/\text{s}$

该工况计算结果见图 7(c)、8。由图 7(c)可知, #4 隔断检修阀前最大瞬态压力为 182 m , #5 隔断检修阀后最大瞬态压力为 145 m ,通过对比发现爆管流量接近最大瞬时爆管流量对管线系统正压波动影响较小。由图 7(c)可知, #4 隔断检修阀前淹没式消能阀最大泄放流量约 5.81

m^3/s , #5 隔断检修阀后淹没式消能阀最大泄放流量约 $3.67 \text{ m}^3/\text{s}$,通过与爆管流量 $14.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 计算结果对比发现,爆管流量接近最大瞬时爆管流量时, #4 隔断检修阀前淹没式消能阀和 #5 隔断检修阀后淹没式消能阀泄放流量均降低,分析原因为该爆管流量工况时爆管点几乎与下游管道完全脱节,管道爆管一瞬间管道流速剧增,爆管点上游管道水柱被严重拉断,管线上游管线流量为不连续非满管流,内水压力降低,从而体现出两处的淹没式消能阀泄放流量降低。

通过对三种爆管流量模拟计算及分析,管线系统无防护时管线被瞬间拉断,从而引起弥合水锤,管线压力升高及负压均不满足规范。投入防护设备后,爆管流量增大对最大压力几乎无影响,最低压力会随着流量增大进一步降低。爆管后需及时切断爆破点上下游的隔断阀,隔断阀关闭时因为爆管流速过高压力急剧升高,隔断阀的上游设置的淹没式消能阀起到关键作用,泄流释放较高的压力。通过对比发现,淹没式消能阀泄放最大流量并非发生在爆管最大流量工况,主要原因为较高的爆管流量会瞬间拉断管线,降低内水压力,导致泄放流量下降。通过计算得出淹没式消能阀泄放最大流量值,为淹没式消能阀招标设计选型提供了依据,避免出现口径选取过大造成投资浪费。

4 结 论

- a. 长距离高落差的倒虹吸在正常运行中开、关末端调节阀,延长开关阀的时间可以解决管线系统压力波动;在谷底上下游合适位置设置隔断检修阀,能够在爆管发生后及时切断上下游水源。
- b. 隔断检修阀上游侧设置淹没式消能阀能很好地泄放隔断检修阀关闭引起的压力升高,在整个水锤防护设备中为关键设备,淹没式消能阀的动作规律采用“全开后保持一定时间后再关闭”,能较好地配合隔断检修阀关闭并释放管线水锤压力。
- c. 谷底上游段管线为凹型,管线谷底完全爆管时,爆管点流量不连续,隔断检修阀前淹没式消能阀泄放流量并非最大。

参 考 文 献:

[1] 刘竹溪,刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
[2] 袁林,李雲龙,寇自洋. 长距离重力输水工程首末两端阀门关闭方案研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 118-121.

- [2] 师广山, 张帆, 王旭辉. 结合正井法施工的水电站调压井和竖井合并布置设计[J]. 西北水电, 2020(3): 67-69.
- [3] 李高会, 刘子乔, 高悦, 等. 连接管对调压室涌波水位和水锤压力的影响[J]. 人民长江, 2017, 48(15): 81-85.
- [4] 黄静之, 周建旭, 刘跃飞, 等. 底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 176-181.
- [5] 徐逸, 蔡付林, 花玉龙. 带侧弯式连接管阻抗式调压室水力特性模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 93-95.
- [6] BESHARAT M, TARINEJAD R, AALAMI M T, et al. Study of a compressed air vessel for controlling the pressure surge in water networks: CFD and experimental analysis[J]. Water resources management, 2016, 30(8): 2687-2702.
- [7] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new κ - ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [8] 陈剑, 杨校礼, 张健. 带连接管的阻抗调压室流量系数及水力损失特性研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 164-167.

Study on Head Loss Characteristics of Combined Layout of Water Diversion Shaft and Surge Chamber in Pumped Storage Power Stations

LIU Xue-shan¹, YING Peng-tao¹, WU Han², BAI Qi-jian³, LIU Zi-rui², HUANG Min³, GUO Wen-cheng³

(1. China Southern Power Grid Energy Storage Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;

3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The pumped storage power stations are critical infrastructure for achieving carbon neutrality goals. Based on the three-dimensional computational fluid dynamics method, the head loss characteristics in the combined diversion shaft-surge chamber arrangement are investigated. Firstly, the three-dimensional model from the upstream inlet to the inlet of the unit is established. Then, the hydraulic characteristics under different arrangement types are analyzed. Finally, the influence of the diameter of the turning section and the impedance holes on the head loss is explored under the combination arrangement. The results indicate that the pressure distributions are similar in combined and uncombined arrangements. The hydrodynamic characteristics are not deteriorated and reflective water hammer is more effective in combined arrangements. Under the combined arrangement, the larger the diameter of the turning section and the impedance hole, the smaller the head loss coefficient is. This study can provide theoretical references for the design of new structures for pumped storage power stations.

Key words: pumped storage power station; surge chamber; combined layout; head loss coefficient; impedance coefficient

(上接第 130 页)

- [3] 中国工程建设标准化协会城市给水排水专业委员会. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程: CECS 193:2005[S]. 北京:中国计划出版社, 2006.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 泵站设计标准: GB5026-2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [5] 刘竹青, 毕慧丽, 王福军. 空气阀在有压输水管路中的水锤防护作用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 333-337.
- [6] 张景望, 吴建华, 高洁, 等. 长距离重力流输水系统水锤模拟及其防护研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 57-60.

Research on Water Hammer Protection of Inverted Siphon Pipe Burst with Long Distance High Drop and Large Flow

LIU You-liang, HU Bin-chao, CAI Yong-fang, TAO Cheng-jun, WANG Long-biao, YIN Da-zhuang (Gansu Province Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute CO., LTD., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The number of long-distance, high drop, pressurized, and self-flowing water pipeline projects is increasing in the northwest region. Most of the pipelines show undulating shapes, and the hydraulic transition process of the entire pipeline system becomes very complex during operation and regulation. When the water hammer protection setting is unreasonable, it will lead to pipe explosion, seriously threatening the safety of people and property. In order to ensure the safe operation of the entire system, the characteristic line method and the HAMMER V8i water hammer analysis software were used to analyze the hydraulic transition process of a long and high drop inverted siphon in a water transmission project. By setting isolation and maintenance valves, submerged energy dissipation valves, and exhaust valves along the pipeline, and setting regulating valves at the end of the pipeline, the positive pressure of the pipeline system is effectively controlled during normal operation and valve closure. By simulating the hydraulic transition process of the pipeline system under different flow rates after pipe explosion, the installation of water hammer protection equipment minimizes the harm caused by pipe explosion. The flow rate of the pipeline system after complete pipe explosion is not continuous. The action time and operation rules of the water hammer protection equipment for long-distance and high drop inverted siphon lines play a crucial role in the safety of the entire system. The research results can provide reference for the similar projects.

Key words: inverted siphon; submerged energy dissipation valve; water hammer; pipe burst